

EDULLINEN UA-LAITE TILAVUUSMITTAUKSESSA

Lukkari Altti

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikan opetusohjelma
Insinööri (AMK)

2016

Tekniikka ja Liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Altti Lukkari	Vuosi	2016
Ohjaaja	Pasi Laurila		
Työn nimi	Edullinen UA-laite tilavuusmittauksessa		
Sivu- ja liitesivumäärä	41 + 1		

Ammattimaisten miehittämättömien ilma-alusten eli UA-laitteiden (Unmanned Aircraft) ohella markkinoilla on paljon valo- ja videokuvaukseen tarkoitettuja edullisia laitteita, joita voidaan soveltaa myös maanmittaukseen. Tämän työn tarkoitus on selvittää edullisen, harrastajakäyttöön tarkoitetun miehittämättömän ilma-aluksen soveltuvuutta tilavuusmittaukseen.

Tutkimuslaitteena oli DJI Phantom 4 -nelikopteri, jolla suoritettiin ilmakehuus kohdealueilta. Valokuva-aineisto käsiteltiin Agisoft PhotoScan -ohjelmalla. Vertailuaineistona käytettiin maalaserkeilaimella mitattua aineistoa. Fotogrammetrialla tuotettuja maastomalleja vertailtiin referenssiaineistoon arvioimalla malleista tehtyjä poikkileikkauksia sekä vertaamalla aineistoista laskettujen tilavuuksien eroja. Harrastajakäyttöön suunnitellun laitteiston soveltuvuutta ammattimaiseen työhön arvioitiin laitteen toiminnallisten rajoitteiden perusteella. Tutkimuskohteina oli sekä muodoiltaan loivapiirteisiä maa- ja kiviainesvarastoja että jyrkkämuotoinen louhosalue.

Tutkimuksen perusteella edullinen nelikopteri ja sen integroitu kamera voivat tuottaa hyvissä olosuhteissa riittävän tarkkaa valokuva-aineistoa fotogrammetriseen mittaukseen ja tilavuuslaskentaan. Jyrkkien, ylitsekaatuvien louhosseinien mallintamisen laatu paranee, kun kohtisuoraan alaspäin kuvattua aineistoa täydennetään kuvauksella seinämää kohti. Edullisten laitteiden puutteellinen suojaus vedeltä ja pölyltä sekä talviolosuhteisiin soveltumattomat käyttölämpötilasuositukset rajoittavat niiden käyttöä ammattimaisessa toiminnassa.

Avainsanat

fotogrammetria, UA, UAV, tilavuusmittaus

Technology, Communication and
Transport
Degree Programme in Land
Surveying
Bachelor of Engineering

Author	Altti Lukkari	Year	2016
Supervisor	Pasi Laurila		
Subject of thesis	Low-cost Unmanned Aircraft in Volume Calculation		
Number of pages	41 + 1		

The purpose of this theses was to study the usability of nonprofessional, low-cost unmanned aircraft in volume calculation surveys. The focus was on the accuracy of the point cloud and the digital elevation model created from aerial photographs. Apart from the accuracy of the model production usability of the device as a survey instrument in general was also evaluated.

The aerial surveys were done by DJI Phantom 4 quadcopter. The aerial photographs were processed and the photogrammetric point clouds were created with The Agisoft PhotoScan software. The reference material was surveyed with ground laser scanning. The survey data was collected in two separate areas. The first area included several soil and rock material stock piles and the other object was an excavation of rock material. The accuracy was evaluated by comparing the calculated volumes between the different models and analysing the cross-sections of the models.

The results proved that with a low-cost UA devices it is possible to produce valid survey data for volume calculations. With low-cost devices there are some significant limitations related to the incomplete ingress protection. This reduces usability of these equipment in some weather conditions. Hence they are more or less supplementary devices beside the conventional land survey equipment.

Key words

photogrammetry, UA, quadcopter, volume calculation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Tilavuusmittaus ja -laskenta.....	8
1.1.1	Mittausmenetelmät	9
1.1.2	Tilavuuslaskenta maastomallilla	9
1.2	Katsaus aiempaan tutkimukseen	10
2	UA - MIEHITTÄMÄTTÖMÄT ILMA-ALUKSET	13
2.1	Miehittämättömän ilmailun käsitteitä	13
2.1.1	UA-laitteet maanmittauksessa.....	14
2.1.2	Miehittämättömän ilmailun lainsäädäntö Suomessa.....	15
3	TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN	17
3.1	Fotogrammetrinen mittaus	17
3.1.1	Kopterikalusto	17
3.1.2	Kuvauksessa käytetty ohjelmisto.....	18
3.1.3	Fotogrammetrisen datan käsittely	19
3.2	Vertailuaineisto	19
4	TUTKIMUSKOHTEET	21
4.1	Utranharju	21
4.1.1	Ilmakuvaus Utranharjulla.....	21
4.1.2	Laserkeilaus	22
4.1.3	Datan käsittely.....	23
4.1.4	Ensimmäinen tilavuuslaskenta	23
4.1.5	Toinen tilavuuslaskenta.....	25
4.1.6	Poikkeamat korkotasossa	26
4.1.7	Yhteenveto Utranharjulta.....	27
4.2	Viinijärvi	28
4.2.1	Laserkeilaus	28
4.2.2	Ilmakuvaus	29
4.2.3	Datan käsittely.....	30
4.2.4	Poikkileikkausaineiston analyysi	31
4.2.5	Yhteenveto Viinijärveltä.....	35

5 POHDINTA	36
5.1 Kopterin soveltuvuus.....	36
5.2 Kameran soveltuvuus	36
5.3 Ohjelmien soveltuvuus.....	37
5.4 Oma arvio	37
LÄHTEET	39
LIITTEET	41

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Ilmakuvien sijainti Utranharjulla	22
Kuvio 2. Signaalien ja kasojen sijainti, laskenta1	24
Kuvio 3. Signaalien ja kasojen sijainti, laskenta2	25
Kuvio 4. Ilmakuvat ja signaalit Viinijärvellä	30
Kuvio 5. Poikkileikkausten sijainti	31
Kuvio 6. Poikkileikkaus 1, katvealueen vaikutus malliin	32
Kuvio 7. Poikkileikkaus 2	33
Kuvio 8. Poikkileikkaus 3	34
Taulukko 1. Tilavuusvertailu 1	24
Taulukko 2. Tilavuusvertailu 2	26
Taulukko 3. Tilavuuserojen jakautuminen pinnalla	26
Taulukko 4. Mallien korkoero kontrollipisteillä	27

ALKUSANAT

Haluan kiittää työn valmistumiseen vaikuttaneita tahoja, jotka auttoivat työn eri vaiheissa ja mahdollistivat työn valmistumisen. Kiitokset Pohjois-Karjalan Aikuisopistolle, jonka laitteistoa ja ohjelmistoja sain käyttää työssäni ja erityisesti opettajalle, Seppo Myllerille, jolta sain idean työhöni ja arvokkaita neuvoja työn eri vaiheissa.

Kiitokset myös Pohjois-Karjalan KTK Oy:lle sekä Sulokivi Oy:lle, jotka mahdollistivat työn kannalta välttämättömät maastomittaukset omissa kohteissaan. Kiitokset ansaitsevat myös Aikuisopiston kartoittajaopiskelijat arvokkaasta maastomittausavusta.

1 JOHDANTO

Ilmakuvaus ja fotogrammetrinen mittaus miehittämättömillä ilma-aluksilla on ollut käytössä yleisesti maanmittausalalla joitakin vuosia ja palveluja tarjoavien toimijoiden määrä kasvaa koko ajan. Samaan aikaan kun erilaiset miehittämättömät ilma-alukset ovat yleistyneet ammattitehtävissä, on yleistynyt myös vastaavan tyyppisten lennokkien lennätys harrastuksena.

Pieniä, lähinnä lasten leluiksi luokiteltavia, mutta kameralla varustettuja minikoptereita saa muutaman kymmenen euron hintaan. Vaativille lennokkiharrastajille on tarjolla korkearesoluutioista video- ja valokuvaa tallentavia multikoptereita, joiden lentoajat mahdollistavat useiden kilometrien lentomatkan yhdellä akun latauksella. Harrastajakäyttöön tarkoitettujen laitteiden ominaisuudet ovat parantuneet ja lähestyneet ammattilaitteita, ja ainakin kokeiluluontoisesti harrastajalaitteita on otettu käyttöön myös ammattimaisessa toiminnassa.

Tässä työssä on tarkoitus selvittää kuinka hyvin edullinen, harrastajakäyttöön tarkoitettu, kauko-ohjattava nelikopteri soveltuu tilavuuslaskennan tarpeisiin tuotettavan mittausdatan keräämiseen. Työssä pääpaino on edullisella kalustolla tuotetun kuva-aineiston soveltuvuus fotogrammetriseen mittaukseen. Keskeinen arviointikriteeri on mittausdatan tarkkuus verrattuna referenssiaineistona käytettävään maalaserkeilausaineistoon ja aineiston tarkkuuden soveltuvuus maa- ja kiiviainesten tilavuusmittaukseen. Mittausdatan tarkkuuden ja soveltuvuuden arvioinnin lisäksi työssä arvioidaan laitteiston muuta käytettävyyttä tilavuusmittauksissa, ammattimaisessa toiminnassa.

1.1 Tilavuusmittaus ja -laskenta

Tilavuuslaskennasta käytetään usein nimitystä massalaskenta, jolla viitataan tilavuuslaskennan tarkoitukseen maarakentamisessa määrittää maa- ja kalliomassojen määriä (Laurila 2010, 104). Massalaskenta on terminä kuitenkin laajempi ja se voi pitää sisällään paitsi tilavuuden määrittämistä myös rakennuskohteiden maa- ja kalliomassojen menekkilaskentaa.

Tässä työssä käytetään tilavuusmittaus-termiä, kun tarkoitetaan tilavuuden määrittämistä mittaamalla. Tilavuuslaskennasta puhutaan, kun tilavuusmittausaineistosta lasketaan kohteiden tilavuuksia.

1.1.1 Mittausmenetelmät

Nykyaikaisilla mittausmenetelmillä saadaan nopeasti koottua laaja ja tiheä mitattujen pisteiden aineisto ja tilavuuslaskenta tapahtuu tietokoneohjelmilla. Maastomallia voidaan mitata monilla mittausmenetelmillä. Takymetri- ja satelliittipaikannusmittauksissa mittaajan täytyy itse viedä havaintolaite jokaiselle mitattavalle pisteelle ja tallentaa pisteen sijainti. Nämä menetelmät ovat sekä hitaita että mitauskohteesta riippuen myös mahdollisesti työturvallisuuden kannalta vaarallisia, esimerkiksi putoamisvaaran vuoksi. Takymetrissä on usein prismaton mittaus, jonka avulla voidaan mitata yksittäisiä pisteitä suoraan mitattavasta pinnasta. Tämä mahdollistaa kävellen saavuttamattomien kohteiden mittauksen turvallisesta paikasta.

Tilavuusmittauksia on nopeuttanut teknologian kehittymisen myötä kahden menetelmän yleistyminen. Laserkeilaus on mahdollista maanpinnalta käsin joko maalaserkeilaimella tai takymetrin keilaustoiminnolla. Laserkeilaus on mahdollista myös ilmasta joko miehitystä tai miehittämättömästä ilma-aluksesta. Toinen yleistynyt menetelmä on fotogrammetrian eli valokuvaukseen perustuva mallintaminen ja mittaus. Fotogrammetrista aineistoa voidaan kerätä myös joko maanpinnalta tai ilma-aluksesta kuvaten. Perinteisen takymetri- ja satelliittipaikannusmittausten hitauden vuoksi jää kerätty pisteaineisto harvaksi ja tilavuuslaskenta ylimalkaiseksi verrattuna laserkeilaus- ja ilmakehuaineistoihin.

1.1.2 Tilavuuslaskenta maastomallilla

Digitaalinen maastomalli (Digital Terrain Model, DTM) on tietokoneella luotu maaston pinnanmuotoa kuvaava malli. Maastomalli perustuu maan pinnalta mitattujen hajapisteiden välille muodostettuun kolmio- tai neliöverkkoon.

Maastomalleihin perustuvassa tilavuuslaskennassa lasketaan kahden kolmio-verkkopinnan (joko kahden eri aikaan mitatun pinnan tai mitatun ja teoreettiseen malliin perustuvan pinnan) välille muodostuvaa tilaa. Tila voidaan jakaa kolmio-prismoihin eli särmiöihin, joiden päät ovat kolmion muotoisia. Kolmioprisman tilavuus voidaan määrittää tarkasti laskemalla. (Laurila 2010, 115–117.) Tätä menetelmää sovelletaan tässä työssä käytettävässä 3DWin-ohjelmassa.

1.2 Katsaus aiempaan tutkimukseen

UA-laitteistoja ja sovelluksia on tutkittu viime vuosien aikana jonkin verran. Opin-
näytetöissä on perehdytty fotogrammetrian keinoin saatavan aineiston tarkkuu-
teen ja datan soveltuvuuteen eri käyttötarkoituksiin. Eri menetelmien käytettä-
vyyttä on selvitetty lähinnä mittaukseen ja datan käsittelyyn kuluvan ajan näkö-
kulmasta.

Ari-Pekka Jokinen (2014) on tutkinut UA-kaluston soveltuvuutta kiviainesten tila-
vuusmittaukseen. Opinnäytetyössään Jokinen tutki kiinteäsiipisen aluksen käy-
tettävyyttä sekä mittaustulosten yhteneväisyyttä referenssiaineistona käytettyyn
VRS GNSS-kartoitukseen. UA-lennokilla kerätty mittaustulokset tuottaa tilavuuslas-
kennassa jonkin verran virhettä. Tämä käy ilmi siten, että kahden eri lennon tuot-
tama aineisto antaa jonkin verran erilaisen lopputuloksen tilavuudessa. Vertailu-
aineistona käytetty GNSS-kartoitukseen verrattuna UA-mittaus antaa poikkeamil-
taan vaihtelevia tuloksia. GNSS-kartoituksesta laaditun pintamallin ja UA-aineis-
tosta luodun pistepilviaineiston väliset tilavuuserot vaihtelevat välillä 1–23 %.
Suurin yksittäinen poikkeama on tilavuudeltaan pienimmästä kasasta ja suurim-
man kasan kohdalla poikkeama on n. 10 %. Näin ollen näyttää, että poikkeaman
suuruus ei olisi suoraan verrannollinen mitattavan kasan kokoon. (Jokinen 2014,
24–30.)

Vertailuaineistona käytetty GNSS-mittaus on sen verran ylimalkainen, että on vai-
keaa sanoa perustellusti, kumpi mittauksista on lähempänä todellista tilavuutta.
Jokinen (2014, 25) pitää pistepilven tiheyden perusteella UA-aluksen avulla mi-
tattua aineistoa tarkempänä. Mitattavan kohteen yksityiskohtien tarkkuus ei kui-
tenkaan ole ainoa mittaustarkkuuteen vaikuttava seikka.

Jokisen (2014) työ antaa hyvän kuvan UA-laitteiston käytettävyydestä kartoitusmittaukseen, kun kriteereinä ovat esimerkiksi mittauksen nopeus ja hinta. Jokinen (2014, 31–32) toteaa UA-kuvauksen soveltuvan kiviaineskasojen tilavuusmittaukseen yhtä hyvin, kuin GNSS-mittauskin. Esiin tulevat, satunnaisilta vaikuttavat, suuret poikkeamat eri mittausmenetelmien välillä antavat kuitenkin hyvän syyn tarkastella lisää UA-laitteiston tarkkuutta tilavuuskartoituksissa. Jopa yli 20 % erot kahden menetelmän välillä vaikuttavat liian suurilta, ainakin mikäli tilavuusmittaus on laskutusperuste.

Isak Helander (2015) on työssään selvittänyt UA-laitteiston käytettävyyttä kartoitusmittauksiin ja vertaillut lennokilla kerättyä fotogrammetriaan perustuvaa mitausdataa ilma-aluksista tehtyihin laserkeilausaineistoihin sekä GNSS-mittauksella koottuun vertailuaineistoon. Helander (2015, 27) toteaa UA-kuvauksen soveltuvan hyvin edullisena vaihtoehtona maastomallikartoitukseen pienillä alueilla ja mittauksen tulos vastaa hyvin ilma-aluksesta suoritettua laserkeilausta. Helanderin (2015) tutkimusalue oli pinnanmuodoiltaan tasaista ja paikoin kasvillisuuden peittämää, joten sen tuloksista ei voida tehdä johtopäätöksiä vastaavan menetelmän käytöstä jyrkkäpiirteisemmän ja kasvillisuudesta paljaan kohteen mallintamisessa.

Sampo Rahko (2015) selvitti UAS:n soveltuvuutta turveauman massalaskentaan käyttäen kiinteäsiipistä alusta ja vertailuaineistona GNSS-mittauksia. Mittausten ero tilavuudessa on n. 1 % ja Rahko toteaa menetelmän soveltuva hyvin massalaskentaan (Rahko 2015, 23–25).

Jeremia Hokkanen (2015) on tutkinut kahdeksan roottorisella UA-kopterilla kuvattua aineistosta laaditun pistepilven vastaavuutta maalaserkeilaimen tuottamaan aineistoon. Hokkanen (2015, 21–24) mukaan laserkeilauksella ja fotogrammetrian keinoin saatujen pistepilvien yhteneväisyys on todella hyvä ja pisteiden korkeussuhteissa olevissa poikkeamissa ei näyttänyt olevan systemaattista virhettä suuntaan tai toiseen. Hokkanen (2015, 24) toteaa, että UA:lla tuotettu pistepilviaineisto ja siitä tuotettu maastomalli voi haastaa laserkeilauksen. Samankaltaiseen tulokseen päätyi myös Ilkka Partonen (2014) tutkiessaan UA-lennokin tuottamaa mittausaineistoa. Sekä Partosen (2014), Rahkon (2015) että

Hokkasen (2015) tutkimuskohteet olivat laakeita alueita, eikä lopputuloksista voida tehdä aukottomia tulkintoja siitä, millainen tarkkuus olisi jyrkkäpiirteisessä kohteessa, kuten maa- ja kiviaineskasoissa tai louhoksissa.

Kaikissa edellä mainituissa tutkimuksissa on käytetty kuvauskalustona ammattikäyttöön suunniteltuja laitteita. Tämän työn tarkoituksena oli keskittyä kevyellä ja edullisella laitteistolla ja ohjelmistolla saatavan aineiston käytettävyyteen tilavuusmittauksessa. Aiemmista tutkimuksista poiketen vertailtavaan aineistoon on otettu mukaan myös jyrkkäpiirteisiä alueita, jotta voidaan selvittää UA-laitteistolla kerätyn, fotogrammetriaan perustuvan datan käyttökelpoisuutta tilavuusmittauksessa.

2 UA – MIEHITTÄMÄTTÖMÄT ILMA-ALUKSET

2.1 Miehittämättömän ilmailun käsitteitä

UA (Unmanned Aircraft) on määritelmänsä mukaan miehittämätön ilma-alus. Aluksista käytetään eri yhteyksissä eri nimityksiä varsin kirjavasti. Yleisesti käytetty lyhenne on UAV (Unmanned Aerial Vehicle), mutta tämä nimitys on jäämässä pois käytöstä. Erityisesti englanninkielisissä lähteissä ja harrastajayhteisissä yleinen nimitys miehittämättömille ilma-aluksille on *drone*, josta näkee toisinaan myös suomenkielistä vastinetta *drooni*.

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi (2015), määrittelee Ilmailulakiin (864/2014 1:2 §) perustuen määräyksessään laitteita ja termejä seuraavasti: **Miehittämättömällä ilma-aluksella** (Unmanned Aircraft, UA) tarkoitetaan ilma-alusta, joka on tarkoitettu lentämään ilman ilma-aluksessa mukana olevaa ohjaajaa. **Kauko-ohjatulla ilma-aluksella** (Remotely Piloted Aircraft, RPA) tarkoitetaan miehittämätöntä ilma-alusta, jota ohjataan kauko-ohjauspaikasta ja käytetään lentotyöhön. **Lennokilla** tarkoitetaan lentämään tarkoitettua laitetta, jonka mukana ei ole ohjaajaa ja jota käytetään harraste- tai urheilutarkoitukseen pois lukien ensisijaisesti lapsille suunnatut laitteet ja kauko-ohjatut ilma-alukset

Vaikka harrastekäytössä oleva lennokki voi kuljettaa esimerkiksi video- ja valokuvauskalustoa, on maanmittausalalla tehtävä ilmakekuvaus tulkittava lentotyöksi, ja kalustoon ja toimintaan on sovellettava kauko-ohjatun ilma-aluksen (RPA) lennättämiseen annettuja määräyksiä.

Miehittämättömiä ilma-aluksia on tyypeiltään kahdenlaisia: kiinteäsiipisiä aluksia sekä yhdellä tai useammalla roottorilla varustettuja koptereita. UA-alus voi olla joko pilotin suorassa ohjauksessa tai laitteelle voidaan määritellä lentoreitti, jota se seuraa laitteen sisäisen satelliittipaikannuksen avulla. Myös ennalta suunniteltua reittiä lentävä alus on oltava kauko-ohjaajan kontrollissa ja haltuun otettavissa.

Miehittämättömien ilma-alusten monenlainen käyttö on lisääntynyt viime vuosina. Erityisesti moniroottoriset, pienet multikopterit ovat yleistyneet sekä ammattimaisessa käytössä että erilaisessa harrastustoiminnassa, kuten valo- ja videokuvauksessa. Erityisesti lisääntynyt harrasteilmailu miehittämättömillä aluksilla on aiheuttanut useita vaaratilanteita lentoliikenteelle. (Trafic 2016a, 1–2.)

Siviilikäytössä UA-laitteita voidaan käyttää esimerkiksi kevyiden esineiden kuljetamiseen. Ensimmäiset kokeilut pakettien jakelussa ja lääkintätarvikkeiden toimituksissa vaikeapääsyisille alueilla ovat olleet käynnissä sekä Yhdysvalloissa että Euroopassa muutamia vuosia. (Wang 2016.)

2.1.1 UA-laitteet maanmittauksessa

Maanmittauksen apuvälineenä miehittämätön ilma-alus varustetaan joko valokuvakameralla tai laserkeilaimella. Toistaiseksi valokuvaukseen perustuva fotogrammetrinen mittaus on UA-kalustolla edullisempi ja siksi yleisempi vaihtoehto. Laserkeilauksella voidaan tavoittaa paremmin esimerkiksi maanpinnan muotoja peitteisessä maastossa. Laserkeilaus-kalusto on toistaiseksi hinnaltaan lähes kymmenkertainen käyttökelpoiseen kamerakalustoon verrattuna, mutta hintaero tulee kapenemaan tulevaisuudessa ja menetelmiä tultaneen käyttämään rinnakkain. (Higgins 2016.)

Markkinoille on tullut viime vuosina paljon edullisia UA-laitteita. Erityisesti pienten kopterien käyttö valo- ja videokuvauksessa on yleistynyt harrastajien keskuudessa. Pienillä, edullisilla ilma-aluksilla ja kevyillä, mutta kehittyneillä kameroilla lähes kuka tahansa saa vähäisellä harjoittelulla ilmavalokuvia, joita voidaan yhdistää ortokuvaksi tai kolmiulotteiseksi pintamalliksi helppokäyttöisillä sovelluksilla. Tämä kehitys on herättänyt huolta siitä, voiko kuka tahansa tarjota mittauspalveluja ja mikä on niiden laatu verrattuna etabloituneiden ammattilaisten tuotteisiin. (Tompkinson 2016.)

2.1.2 Miehittämättömän ilmailun lainsäädäntö Suomessa

Ilmailua, johon myös miehittämättömän ilma-aluksen lennättäminen kuuluu, Suomessa sääntelee Ilmailulaki (864/2014). Ilmailulakia täsmällisemmin UA-toimintaa sääntelee Liikenteen turvallisuusvirasto Trafín määräys *Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen* (Trafi 2015).

Mittaustyön kannalta keskeisiä vaatimuksia kauko-ohjatulle ilma-alustoiminnalle on paljon, koska mittaustyö on ammattimaista ja taphtuu usein taajaan asutuilla alueilla. Käyttäjän on ennen ilma-aluksen ensimmäistä käyttökertaa ilmoitettava Liikenteen turvallisuusvirastolle tiedot käyttäjästä, ilma-aluksesta, toiminnan laadusta ja laajuudesta sekä tiedot aiotaanko toimintaa harjoittaa asutuskeskuksen tiheästi asutulla alueella ja/tai aiotaanko toimintaa harjoittaa väkijoukon yläpuolella. Mahdolliset muutokset tietoihin on ilmoitettava viipymättä. (Trafi 2015, 2–3.)

Ilma-aluksen lentoonlähtömassa saa olla enintään 25 kg. Lennätyksen on oltava näköyhteyteen perustuvaa. Lennätystoiminta ei saa haitata viranomais- tai ensivasteyksikön (pelastuslaitoksen) toimintaa eikä aiheuttaa vaaraa ulkopuolisille ihmisille tai heidän omaisuudelleen. Kauko-ohjatussa aluksessa tulee olla järjestelmä, joka minimoi aiheutuvan vaaran tilanteessa, jossa ohjaukseen ja valvontaan tarvittavat yhteydet katkeavat. Alusta ei toistaiseksi tarvitse rekisteröidä, mutta laitteesta on käytävä ilmi sen käyttäjän nimi ja yhteystiedot. Kauko-ohjatuista lennoista on talletettava ja säilytettävä kolmen vuoden ajan tiedot lennätyksen päivämäärästä ja kellonajasta, lennätyspaikasta, ilma-aluksen päälliköstä, ilma-aluksen valmistajasta ja mallista sekä lennätystehtävän luonteesta. (Trafi 2015, 3–4.)

Yleisesti lennätyskorkeuden on oltava alle 150 metriä maan tai veden pinnasta. Lennättäminen alempana kuin tehtävän edellyttämällä korkeudella ei ole sallittu. Lentoaseman läheisyydessä, lentopaikan lentotiedotusvyöhykkeellä tai radiovyöhykkeellä suurin sallittu korkeus on 50 metriä. Mikäli lennätys tapahtuu lähempänä kuin 5 km etäisyydellä kiitotiestä, tai korkeammalla kuin 50 m edellä mainituilla alueilla tai se tapahtuu Jyväskylän tai Utin lentoasemien lähialueella, on len-

nätyksistä sovittava erikseen ilmaliikennepalvelun tarjoajan kanssa. Kauko-ohjatun ilma-aluksen lennättämisessä on kiinnitettävä erityistä huomiota valvomattomien lentopaikkojen ja helikopterilentopaikkojen (esimerkiksi suuret sairaalat) läheisyydessä. Kaikista kauko-ohjatuille ilma-aluksille tapahtuneista onnettomuuksista ja poikkeavista tilanteista tulee ilmoittaa Liikenteen turvallisuusvirastoon viraston antamien tarkempien ohjeiden mukaisesti. (Trafi 2015, 4–5.) Lentoasemien läheisyydessä oleva rajoitusvyöhyke on huomattavan laaja. Yleensä alue on kiitotien suuntainen ja leveydeltään n. 26 km ja pituudeltaan n. 40 km. Näin ollen rajoitusalueen sisään jää lähes aina kaupunkien keskustaajamat ja muita maanmittaustyön kannalta keskeisiä alueita. Tarkemmat lentoasemakohtaiset tiedot löytyvät Finavia Oyj:n julkaisemasta Suomen Ilmailukäsikirjasta (AIP). (Finavia 2016.)

Mikäli lennättäminen tapahtuu erityisissä olosuhteissa eli väkijoukon tai asutuskeskuksen tiheästi asutun osan (asutuskeskittymän, jossa on vähintään 200 asukasta ja asuinrakennusten etäisyys toisistaan enintään 200 metriä) yläpuolella, on noudatettava vielä tiukempia määräyksiä. Ilma-aluksen suurin lentoonlähtömassa on seitsemän kg, jonka lisäksi aluksessa voi olla kiinnitetty pelastuslaite. Lennätettäessä on käytettävä sellaista lentokorkeutta, että hätätilanteessa voidaan suorittaa lasku aiheuttaen mahdollisimman vähän vaaraa ulkopuolisille ihmisille tai heidän omaisuudelleen. Ilma-aluksen käyttäjän on laadittava kirjallinen turvallisuusarvio ja toimintaohjeistus sekä normaalitoimintaan että toimintaan häiriötilanteissa. Nämä dokumentit on esitettävä pyynnöstä valvontaviranomaiselle ja säilytettävä kolme kuukautta toiminnan päättymisestä. (Trafi 2015, 4–5.)

Kauko-ohjatulla ilma-aluksella on oltava ilmailun vakuutusasetuksen mukainen vakuutus. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 785/2004). Lennokkitoiminnassa käytössä oleva lennättäjän oma vakuutus ei riitä toimintaan RPAS laitteella. (Trafi 2016b.)

3 TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN

Työhön on valittu kaksi toisistaan poikkeavaa tutkimuskohdetta: Ensimmäinen kohde oli selkeäpiirteinen maa- ja kiviainesvarasto, jonka tasaiselle pohjalle materiaali on läjitetty selkeämuotoisiin kasoihin. Toinen kohde oli tarvekivilouhos, joka valittiin tutkimuskohteeksi jyrkkien, seinämäisten muotojen vuoksi. Kahden tutkimuskohteen valinnalla oli tarkoitus selvittää menetelmän käyttökelpoisuus erilaisissa maarakentamiselle tyypillisissä tilavuusmittauskohteissa.

Työssä mitattiin maa- ja kiviainesten tilavuusmittauksen kannalta tyypillisiä kohteita ilmakuvauksella ja laserkeilauksella. Mittausaineistoista muokatuista piste-pilvistä luotiin digitaaliset maastomallit. Eri menetelmin luotujen aineistojen yhdenmukaisuutta vertailtiin sekä tilavuuslaskennan että poikkileikkausvertailun avulla.

3.1 Fotogrammetrinen mittaus

3.1.1 Kopterikalusto

Ilmakuvaukset suoritettiin DJI Phantom 4 -nelikopterilla. Phantom 4 edustaa tutkimushetkellä harrastajalaitteiden viimeisintä teknologiaa. Laitteen hinta (tutkimushetkellä n. 1500 €) oli harrastajalaitteiden kalliimmasta päästä, mutta kopteri on selvästi edullisempi, kuin ammattikäyttöön suunnitellut laitteet. Laitteen harrastajakäytöstä kertoo myös se, että Phantom 4 -kopteria myydään valokuvausliikkeiden lisäksi kodinkonekaupoissa ja suurissa marketeissa.

DJI Phantom 4 -nelikopterin valmistaja antaa käyttölämpötilarajoiksi 0 °C – 40 °C. Phantom 4 -nelikopteri ei ole vedeltä tai kosteudelta suojattu, joten käyttö vesi- tai lumisateella ei ole valmistajan ohjeen mukaan mahdollista. (DJI 2016, 60–61.) Nämä ominaisuudet asettavat huomattavia rajoituksia laitteen ympärivuotiselle käytölle Suomen ilmasto-olosuhteissa.

Phantom 4 -nelikopterin pisin lentoaika yhdellä akun latauksella on valmistajan ilmoituksen mukaan 28 minuuttia. Tämä mahdollistaa 90 % pituuspeitolla ja 70 % sivupeitolla n. seitsemään hehtaarin alueen kuvaamisen 50 m lentokorkeudella

ja n. 30 hehtaarin alueen kuvaamisen 100 m lentokorkeudella. Map Pilot for DJI -ohjelmassa on käytössä ominaisuus, jolla voidaan suunnitella laajempia lentoja, jotka ositetaan akun keston mukaisiin osiin. Näin akun kesto ja lentoaika eivät ole työskentelyä rajaavia tekijöitä.

DJI Phantom 4 -nelikopterissa on integroitu kamera (ks. Liite 1). Kamera on kiinteäpolttovälinen ja maastoresoluutio on verrannollinen vain lentokorkeuteen. 50 m korkeudelta kuvattuna yhden kuvapikselin koko maastossa on 22 mm ja 100 m korkeudelta kuvattuna 44 mm. Kuvaukset suoritettiin valoisassa, puolipilvisessä säässä ja kameran valotusasetuksina käytettiin molemmissa tutkimuskohteissa kuvausohjelman valotusautomaatiikkaa.

3.1.2 Kuvauksessa käytetty ohjelmisto

Phantom 4 -kopteria ohjataan kauko-ohjaimella, johon on liitetty joko Android- tai iOS-käyttöjärjestelmällä varustettu tablettitietokone tai matkapuhelin. Ohjaukseen käytettävässä laitteessa tulee olla asennettuna DJI Go -ohjelma, jonka avulla hallitaan kopterin lennätystä, kameran toimintaa sekä käyttäjätiliä. Käytössäni oli Apple iPad-tabletti. DJI Go -ohjelman avulla voidaan määritellä mm. lennätyksen turvallisuuteen vaikuttavia asetuksia sekä vastaanottaa suoraan kameran välittämää kuvaa.

Map Pilot for DJI on iOS 8 ja -9 käyttöjärjestelmillä toimiva DJI:n valmistamille miehittämättömille koptereille tarkoitettu ilmakuvausohjelma. Map Pilot -ohjelmalla voidaan suunnitella ilmakuvaus etukäteen halutulle alueelle, joka rajataan ilmakuvalta tai kartalta. Ohjelma on sovitettu toimimaan yhdessä tiettyjen kopterien kanssa ja kun käytettävä ilma-alus on valittu, ohjelma määrittelee kameraasetukset oikein. Käyttäjä voi määritellä mm. kuvattavan alueen, lentokorkeuden sekä kuvauksen pituus- ja sivupeiton, joiden perusteella ohjelma laskee lentoreitin ja kuvien lukumäärän. Lentonopeuden ohjelma sovittaa kuvaushetkellä vallitsevan valaistusolosuhteen mukaan. (Drones made easy 2016.) Ohjelman hinta oli App Storessa syksyllä 2016 9,99 € (AppStore 2016).

3.1.3 Fotogrammetrisen datan käsittely

Työssä valokuvamateriaalia käsiteltiin Agisoft PhotoScan -ohjelmalla. Agisoft PhotoScan on venäläinen fotogrammetriaohjelma, jonka avulla voidaan yhdistää automaattisesti jopa useita tuhansia valokuvia yhdeksi kokonaisuudeksi ja tuottaa tästä yhdistelmätiedosta erilaisia tuotteita mittauksen ja visualisoinnin tarpeisiin. Mahdollisia tuotteita ovat mm. pistepilviaineisto, teksturoitu polygonimalli, georeferoitu ortomosaiikki, digitaalinen maastomalli (DTM) ja korkeuskäyrät mallista. (Agisoft 2016a, 2–3.) Tässä työssä käytettiin Agisoft PhotoScan Pro -ohjelmiston versiota 1.2.6. 64 bit.

PhotScan Pro -ohjelmistossa on myös erilaisia mittaustyökaluja, kuten pinta-alan ja tilavuuden mittaaminen (Agisoft 2016a, 10). Ari-Pekka Jokisen (2014, 26–28) tekemän tutkimuksen mukaan PhotoScan-ohjelmalla ei voida määrittää tilavuutta kovin tarkasti. Ohjelma ei suoraan mahdollista tilavuuden laskemista kahden mitatun pintamallin välille, joten tilavuus voidaan määritellä vain mitatun pinnan ja mallin reunoja myötäilevän laskennallisen pinnan rajaamalle kappaleelle.

3.2 Vertailuaineisto

Ilmakuvausaineistoa verrattiin laserkeilauksella tuotettuun aineistoon, joka on mitattu Leica MS50 takymetrillä, jossa on laserkeilausominaisuus. MS50-takymetrin keilausominaisuuden kantama on nopeimmalla (1000 p/s) keilauksella n. 300 m ja hitaammalla nopeudella jopa 1000 m. Keilauksen etäisyysmittaustarkkuus on n. 1 mm. Laitteen toimintaolosuhteet ovat laajemmat, kuin useimmilla tavanomaisilla maalaserkeilaimilla. Laite on pölyltä ja vedeltä suojattu (IP65) ja mittaus on mahdollista myös pakkasella -20 °C:n asti. (Leica 2016, 2.)

Toisena vaihtoehtona mittaukseen oli Trimble TX8 maalaserkeilain, mutta tämän laitteen pienempi kantama (120 m) ei ollut riittävä työkohteessa. Laserkeilaus em. Leica MS50 -kalustolla on valittu vertailumenetelmäksi sen tarkkuuden ja olosuhteista riippumattoman toistettavuuden vuoksi.

Laserkeilauksen rajoitteet tilavuusmittauksissa liittyvät erityisesti mahdollisiin katvealueisiin. Lähellä maanpintaa olevalta keilaimelta ei ole suoraa näköyhteyttä useiden korkeiden kasojen välille. Tämän ongelman eliminomiseksi tässä työssä mitattavat kohteet on valikoitu siten, että maalaserkeilaimelta olisi mahdollisimman esteetön näkyvyys kaikkiin mitattaviin pintoihin. Tällä tavoin eri mittauskohteista saadaan yhtä kattava ja luotettava vertailuaineisto tilavuuslaskentaan.

Laserkeilausaineisto purettiin Leica Infinity-ohjelmalla ja pistepilviaineisto käsiteltiin ja vietiin edelleen käytettäväksi Trimble Real Works -ohjelmalla.

Ensimmäisen tutkimuskohteen pistepilviaineistot kolmioitiin ja tilavuudet laskettiin 3DWin-ohjelmalla. 3D-Win on suomalaisen 3D-system Oy:n valmistama ohjelmisto maanmittaustiedon tuottamiseen ja käsittelyyn. Ohjelma on Suomessa yleisesti käytetty. 3D-Win-ohjelmaan on saatavilla 3D-DTM -laajennus, jolla on mahdollista käsitellä maastomalliaineistoja sekä tehdä tilavuuslaskentaa. Työssä käytettiin 3DWin -ohjelmiston versiota 6.2.3.

Surpac on erityisesti kaivosteollisuudessa käytetty geologisen tiedon käsittelyn ja kaivossuunnittelun ohjelma. Tässä tutkimuksessa Surpac-ohjelmaa käytettiin mallien poikkileikkausaineiston tuottamiseen. Työssä käytettiin Surpacin versiota 6.6. Lapin Ammattikorkeakoulun Citrix-verkkopalvelun kautta.

4 TUTKIMUSKOhteET

4.1 Utranharju

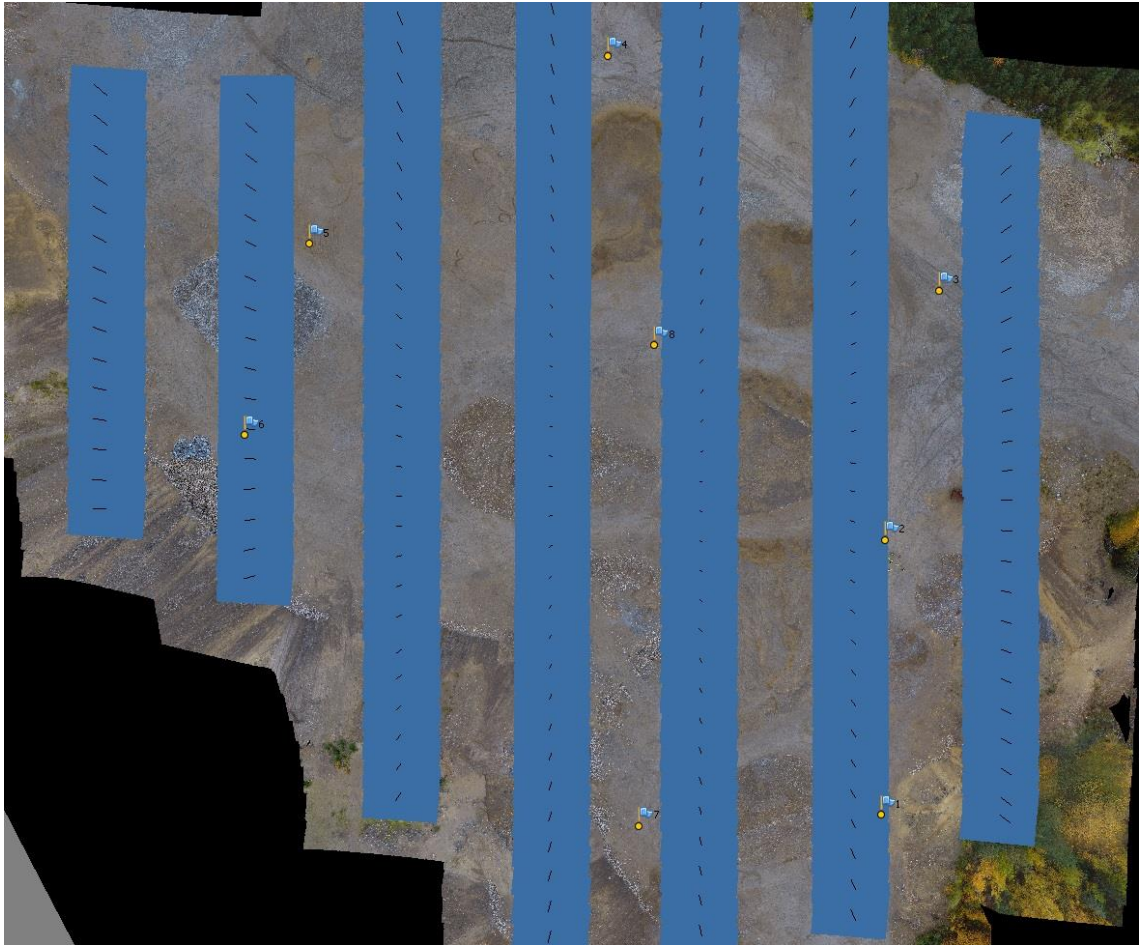
Ensimmäinen mittauskohde oli Utranharjun soranottoalue Joensuussa. Alueella toimii Pohjois-Karjalan KTK Oy. Alueella käsitellään ja varastoidaan erilaisia kivi- ja maa-aineksia. Mittausten aikana Utranharjun soranottoalueella ei ollut toimintaa ja mitattavissa kohteissa ei tapahtunut mittausten aikana mitään muutoksia.

Utranharjun alueella on runsaasti maa- ja kiviaineskasoja, joista tähän työhön valittiin kuusi. Mitattaviksi valittiin kasoja, joihin oli hyvä näköyhteys yläviistosta, alueen korkeilta reunoilta ja laserkeilaukseen jäi näin mahdollisimman vähän katvealueita. Kaikki kasat olivat muodoltaan selkeitä, yleensä loivia kartioita. Kasat erottuvat maastossa, laserkeilausaineistossa sekä ilmakuville selvästi.

4.1.1 Ilmakuvaus Utranharjulla

Utranharju sijaitsee Joensuun lentoaseman valvotussa ilmatilassa. Kohde on kuitenkin kauempana kuin 5 km lentoaseman kiitotiestä. Näin ollen suurin sallittu lentokorkeus ilman lennonjohdon lupaa on 50 m.

Lentosuunnitelma tehtiin paikanpäällä. Mittaukseen valitut kasat sijaitsivat n. 2,5 hehtaarin alueella. Lennon suunnittelua vaikeutti se, että alueelta MapPilot-ohjelman käytössä oleva ilmapäätös-aineisto ei ollut ajan tasalla ja kuvausalueella ei ollut mahdollista rajata tarkoituksenmukaisimmalla mahdollisella tavalla. Tämän vuoksi lentosuunnitelmaan jätettiin ylimääräistä varaa joka suuntaan ja lennolla kartoitettava alue oli n. kuusi hehtaaria. Alueella aseteltiin kahdeksan vanerilevysignaalia, joiden koko oli 60 cm x 60 cm (Kuvio 1). Signaalien sijainnit mitattiin GNSS-mittauksella. Laserkeilaus sidottiin samaan koordinaatistoon asemoimalla takymetri signaalien avulla.



Kuvio 1. Ilmakuvien ja signaalien sijainti Utranharjulla

Ilmakuvauksen pituuspeitoksi määriteltiin 90 % ja sivupeitoksi 62 %. Lentokorkeus oli suurin alueella sallittu 50 m. 50 m lentokorkeudella kuvapikselin koko maastossa on 22 mm. Lennolle määritellyllä suunnitelmalla kuvia kertyi kaikkiaan n. 300. Lopullisesta aineistosta poistettiin reuna-alueiden kuvia, joissa ei näkynyt signaaleja eikä mitattavia kohteita lainkaan. Lopulliseen kuvien käsittelyyn jäin n. 200 kuvaa (Kuvio 1).

Kasojen alarajat olivat selkeästi tasaisesta pohjasta erottuvia ja ne olisi ollut mahdollista tulkita pistepilviaineistostakin. Kasojen alareunat mitattiin kuitenkin osin GNSS- mittauksella ja osin takymetrimittauksella.

4.1.2 Laserkeilaus

Laserkeilaus suoritettiin kolmesta eri suunnasta siten, että kaikki mitattavat kasat näkyivät mahdollisimman kattavasti. Keilausten pistetiheys määriteltiin siten, että

kauimmaisissa kohteissa se oli n. 0,3 m. Keilaukset menivät suurelta osin limit-täin, joten pistetiheys oli lähes kauttaaltaan huomattavasti suurempi. Laserkeilai-men tuottamaa pistepilveä harvennettiin Trimble Real Works -ohjelmalla siten, että pisteväliksi tuli n. 0,2 m. Pistepilven harventamisen tarkoituksena oli pienenen-tää aineistoa, jotta sen käsittely 3DWin-ohjelmalla olisi kevyempää.

4.1.3 Datat käsittely

Ilmakuvausaineistosta tuotettiin pistepilvi Agisoft Photoscan Pro -ohjelmalla. Va-lokuvien yhdistämisessä, maaston muodon mallintamisessa ja pistepilven luomi- sessa noudatettiin Agisoftin (2016b) opasta ortomosaiikin ja maastomallin luo- miseksi.

Kumpaankin pistepilviaineistoon lisättiin mittausten yhteydessä kartoitetut kaso- jen alarajat viivoina. Molemmat pistepilviaineistot kolmioitiin 3DWin-ohjelmalla. Kolmioverkkoja luotaessa käytettiin samoja parametreja ja näin pyrittiin saamaan sisäiseltä tarkkuudeltaan yhteneväisiä maastomalleja. Kasojen alapuolisen poh- jan tilanteesta ei ollut käytettävissä kartoitusta, joten todellisia tilavuuksia ei ollut mahdollista laskea. Tämän tutkimuksen kannalta tällä ei ollut merkitystä, koska tässä tutkittiin mittausmenetelmien ominaisuuksia pinnan mallintamisessa. Ka- sojen mitatuista alarajoista muodostettiin yhtenäinen pintamalli, jota käytettiin pohja-aineistona molemmissa tilavuuslaskennoissa.

4.1.4 Ensimmäinen tilavuuslaskenta

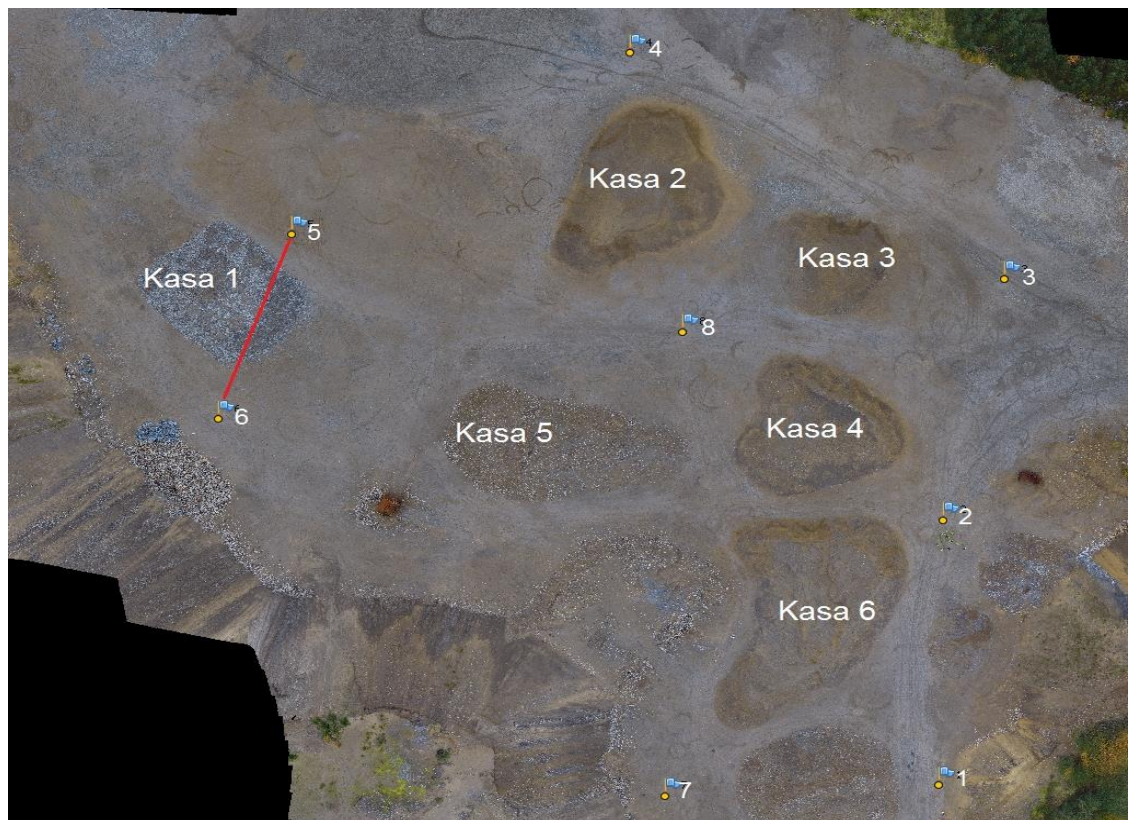
Eri mittausmenetelmillä saatujen aineistojen tilavuudet laskettiin 3D-Win-ohjel- malla. Yhdellä ohjelmalla suoritettu laskenta mahdollistaa mittausmenetelmästä riippumattoman laskennan ja eri aineistojen luotettavan vertailun. Taulukossa 1 on laserkeilauksesta ja fotogrammetrisesta mittauksesta lasketut kasojen tilavuu- det. Eri mittausten tilavuuserot on ilmoitettu sekä absoluuttisena tilavuutena että suhteellisenä osuutena.

Taulukko 1. Tilavuusvertailu 1

	keilaus m ³	fotogram. m ³	ero m ³	ero %
Kasa 1	1574	1524	-50	-3,18
Kasa 2	2852	2820	-32	-1,12
Kasa 3	880	869	-11	-1,25
Kasa 4	2412	2405	-7	-0,29
Kasa 5	2273	2290	17	0,75
Kasa 6	2645	2620	-25	-0,95

Vertailusta voidaan päätellä, että fotogrammetrialla tuotettu pistepilvi vastaa hyvin laserkeilauksella tuotettua pistepilveä. Kuudesta mitatusta kohteesta viidessä poikkeama oli enintään 1,25 %.

Aineistosta nousee kuitenkin esille Kasa 1, jonka kohdalla poikkeama on yli 3 %. Mittausaineistosta on mahdotonta yksiselitteisesti päätellä poikkeaman syytä. Kasan 1 sijainti poikkeaa kuitenkin muista: Kasa 1 on selvästi erillään muista ja osa kasasta sijaitsee signaalien rajaaman alueen ulkopuolella. Kuviossa 2 äärimmäisiä signaaleja 5 ja 6 yhdistävä linja on piirretty punaisella viivalla.



Kuvio 2. Signaalien ja kasojen sijainti, laskenta 1

4.1.5 Toinen tilavuuslaskenta

Mittausta ei voida virheettömästi toistaa enää maastossa, joten signaalien sijainnin vaikutusta pistepilveen ja siten kasojen tilavuuteen selvitettiin seuraavalla kokeella: Alkuperäiset kuvat yhdistettiin samoilla parametreilla, mutta aineiston sijoittamisessa koordinaatistoon jätettiin signaalit 5 ja 6 kuvien kohdistamisvaiheessa pois. Näin kasa 1 jäi n. 75 m etäisyydelle signaaleista 4, 8 ja 7 ja siten kokonaisuudessaan signaalien rajaaman alueen ulkopuolelle. Kasa 5 jäi signaalien rajaaman alueen rajalle, mutta kokonaan sen ulkopuolelle ja kasa 2 jäi puollittain signaalien rajaaman alueen ulkopuolelle. Toisen laskennan äärimmäisissä signaaleja 4, 8 ja 7 yhdistävä linja on piirretty punaisella (Kuvio 3).



Kuvio 3. Signaalien ja kasojen sijainti, laskenta 2

Taulukossa 2 on esitetty toisen tilavuuslaskennan tulokset, sekä ensimmäisen (L1) ja toisen laskennan (L2) keskinäiset erot sekä absoluuttisina tilavuuksina että tilavuuksien suhteellisena erona.

Taulukko 2. Tilavuusvertailu 2

	keilaus m ³	fotogram. m ³	ero m ³	ero %	ero L1 L2 m ³	ero L1 L2 %
Kasa 1	1574	1437	-137	-8,70	-87	-5,71
Kasa 2	2852	2782	-70	-2,45	-38	-1,35
Kasa 3	880	869	-11	-1,25	0	0,00
Kasa 4	2412	2398	-14	-0,58	-7	-0,29
Kasa 5	2273	2236	-37	-1,63	-54	-2,36
Kasa 6	2645	2613	-32	-1,21	-7	-0,27

Tuloksista voidaan havaita, että signaalien lukumäärän väheneminen vaikutti kaikkien kasojen tilavuuteen jonkin verran, mutta kokonaan signaalien sisäpuolella sijaitsevien kasojen (3, 4 ja 6) kohdalla ero oli marginaalinen. Signaalien rajaaman alueen ulkopuolella kokonaan (1 ja 5) tai osittain (2) sijaitsevien kasojen tilavuuspoikkeama on merkittävästi suurempi ja etäisyyden kasvaessa erokin kasvaa. Kasan 1 kohdalla tilavuusero laserkeilaukseen ja ensimmäiseen fotogrammetriseen laskentaan nähden on huomattavan suuri. Tämä havainto tukee oletusta, että ensimmäisen mittauksen kohdalla havaittu, muita kohteita suurempi tilavuuspoikkeama kasan 1 kohdalla on seurausta signaalien huonosta sijoittamisesta.

4.1.6 Poikkeamat korkotasossa

Taulukossa 3 on esitetty laskentojen väliset tilavuuspoikkeamat suhteessa kasojen vinopinta-aloihin eli luiskapinta-aloihin.

Taulukko 3. Tilavuuseron jakautuminen pinnalla

	vinopinta-ala m ²	keilaus m ³	fotog. L1 m ³	ero m ³	korkeusero pinnassa m
Kasa 1	861	1574	1524	-50	-0,06
Kasa 2	1135	2852	2820	-32	-0,03
Kasa 3	515	880	869	-11	-0,02
Kasa 4	1015	2412	2405	-7	-0,01
Kasa 5	1129	2273	2290	17	0,02
Kasa 6	1355	2645	2620	-25	-0,02

Laskelmasta voidaan päätellä, että mikäli tilavuuspoikkeaman oletetaan jakautuvan tasaisesti mallinnettaville pinnoille, muodostuu korkeustason poikkeamaksi

yleisesti n. 20 mm. Kasan 1 kohdalla olevaa suurempaa poikkeamaa on selvitetty aiemmin.

Mallien korkeustason tarkkuutta tarkasteltiin vielä vertaamalla malleja 14 satunnaisesti valitulla, eri puolilla mittauskohdetta sijaitsevalla kontrollipisteellä. Taulukosta 4 käy ilmi, että kahden pisteen kohdalla poikkeama oli yli 50 mm, ja muilla pisteillä poikkeama oli enintään 30 mm. Systemaattista poikkeamaa suuntaan tai toiseen ei ole havaittavissa. Tämä havainto tukee laskettujen tilavuuksien ja kasojen pinta-alojen suhteesta (Taulukko 3) määritettyä korkeuspoikkeamahavaintoa.

Taulukko 4. Mallien korkoero kontrollipisteillä

Kontrollipiste	korkeusero m
1	+0.02
2	-0.02
3	+0.01
4	+0.00
5	-0.03
6	-0.00
7	-0.00
8	-0.03
9	-0.01
10	-0.01
11	+0.00
12	+0.07
13	+0.06
14	+0.01

4.1.7 Yhteenveto Utranharjulta

Tilavuuspoikkeamat eri menetelmillä mitattuina ovat mitattujen kasojen kokoluokassa keskimäärin pieniä (< 2 %). Tulos vastaa hyvin esimerkiksi Rahkon (2015, 22–23) tutkimuksessaan saamaa tulosta. Vertailtaessa tilavuuspoikkeamia suhteutettuna mitattavien kasojen pinta-aloihin, näyttää pintamallien keskinäinen poikkeama oleva korkeustasossa n. 20 mm. Suuruusluokaltaan 20 mm vastaa

mitattujen kasojen maa- ja kiviainesten raekokoa, joten poikkeamaa voidaan pitää tilavuuslaskennan kannalta pienenä.

Merkittävä tutkimuksessa esiin tuleva havainto liittyy ilmakuvaussignaalien sijoitteluun mittausalueella. Niillä alueilla, jotka sijaitsevat signaalien rajaaman alueen ulkopuolella näyttää mallin virhe referenssiaineistoon nähden kasvavan sitä enemmän mitä kauempana alue signaaleista sijaitsee. Signaalit tulisi sijoittaa siten, että mitattava alue jää kokonaan signaalien rajaaman alueen sisäpuolelle.

4.2 Viinijärvi

Toinen tutkimuskohde oli Sulokivi Oy:n tarvekilouhos Liperin kunnassa, Viinijärven taajaman läheisyydessä. Louhoksen alue oli kokonaislaajuudeltaan noin kaksi hehtaaria. Kohteen valinnan perusteena oli saada tutkimukseen mukaan jyrkkiä pinnanmuotoja, jotta voidaan arvioida tutkittavan menetelmän kykyä mallintaa myös louhosmaisen ympäristön muotoa selkeiden loivien kartiomuotoisten kasojen lisäksi.

Ensinäkemältä paikka poikkesi karttojen ja ilmakuvien pohjalta muodostuneesta ennakkomielikuvasta: Louhoksen seinämä oli laajalta alalta pystysuoraa jyrkempi eli ylitsekaatuva. Seinämä on louhittaessa lohjennut luonnollisten kallion rajapintojen mukaisesti. Seinämän jyrkkyys on jyrkimmiltä osiltaan n. 20°–22° ylitsekaatuva. Kyseinen seinämämuoto aiheuttaa ongelmia mallintamisessa eivätkä kolmiointi ja tilavuuslaskenta onnistu ohjelmilla, joiden pistepilviaineiston kolmiointi perustuu xy-tason näkymään, kuten alun perin tarkoitukseen aiotulla 3DWin-ohjelmalla. Kohde oli kuitenkin muuten mittaukselle sopiva: Louhoksen seinämä oli hyvin näkyvissä laserkeilaimelle ja kohde oli turvallinen myös ilmakuvaukselle.

4.2.1 Laserkeilaus

Vertailuaineistoksi kohteesta tehtiin laserkeilaus Leica Nova MS50 –takymetrin keilausominaisuudella. Louhoksen seinämä keilattiin kolmesta eri kojeasemasta

siten, että kaikki mittaukseen halutut pinnat tulivat mahdollisimman kattavasti mitattua.

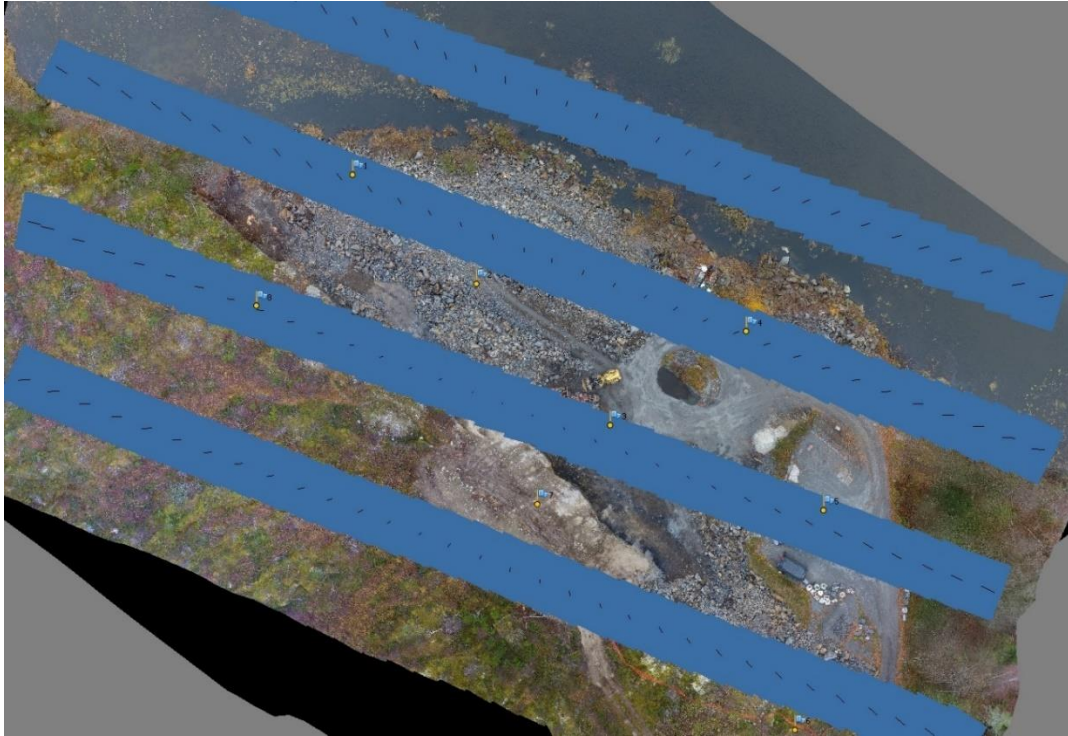
Keskimääräinen pistetiheys keilatessa oli n. 20 cm. Keilaukset menivät suurelta osin limittäin, joten pistepilven tiheys oli lopullisessa, yhdistetyssä pistepilvessä vähintään n. 10 cm. Tämä tiheys katsottiin riittäväksi, koska mitattavan kohteen muodot olivat piirteiltään suurempia kuin yksittäisten mittauspisteiden keskinäinen etäisyys.

4.2.2 Ilmakuvaus

Ilmakuvauksen lähtökohtainen perusmenetelmä on kuvata jonoja alueen yli lentäen. Kuvat otetaan ilma-aluksesta kohti nadiiria eli kohtisuoraan alaspäin. Tämä menetelmä soveltuu hyvin loivapiirteiseen maastoon, jolloin kaikki pinnanmuodot tulevat kuvauksessa ja mallinnuksessa näkyville.

Ennako-oletuksena jyrkkien muotojen mallintamisesta oli, että jyrkkäpiirteisessä maastossa ja erityisesti kohteissa, joissa on pystysuoria tai sitäkin jyrkempiä pintoja, nadiiria kohti kuvattaessa voi osa pinnoista jäädä näkymättä kuvissa. Phantom 4 -kuvauksopterin kameran diagonaalinen näkökenttä (Field of view) on 94° (Liite 1). Kameran näkökenttä kuvan leveyssuunnassa on n. 81° ja pituussuunnassa n. 65° (Lyons 2016). Teoreettisesti kuvan äärialueilla, kulmissa, kuvassa näkyisi jopa 45° ylitsekaatuvia pintoja.

Kuvausalueelle sijoitettiin 60x60 cm vanerilevysignaaleja kahdeksan kappaletta oheisen kuvion 4 mukaisesti. Signaalien sijainti mitattiin omassa koordinaatistossa takymetrillä keilausten yhteydessä ja signaaleja käytettiin takymetrin asemoiintiin keilauksissa.



Kuvio 4. Ilmakuvat ja signaalit Viinijärvellä

Ennalta ohjelmoidussa lennossa pituuspeitoksi määriteltiin 90 % ja sivupeitoksi 65 %. Kohteen sijainti ei aseta yleisestä maksimikorkeudesta 150 m poikkeavia rajoituksia. Lentokorkeudeksi valittiin 50 m, koska se on sama kuin ensimmäisessä kohteessa ja mitattava kohde oli pinta-alaltaan niin pieni, että lentoaika oli kohtuullinen ja koska 50 m on usein kaupunkien läheisyydessä korkein sallittu lentokorkeus.

Mahdollisten katvealueiden vuoksi kuvausta täydennettiin ottamalla lisäkuvia louhoksen seinämästä lennättämällä kuvauskohteria manuaaliohjauksella sivuttain seinämän suuntaan nähden ja ottamalla kuvia yläviistosta seinämää kohti. Manuaalisessa ohjauksessa suoritettavassa kuvauksessa käytettävä kuvausohjelmisto ei mahdollista kuvien peiton määrittelyä ennakolta vaan kuvaaja joutuu itse arvioimaan peiton riittävyyden kuvaustilanteessa silmämääräisesti.

4.2.3 Datat käsittely

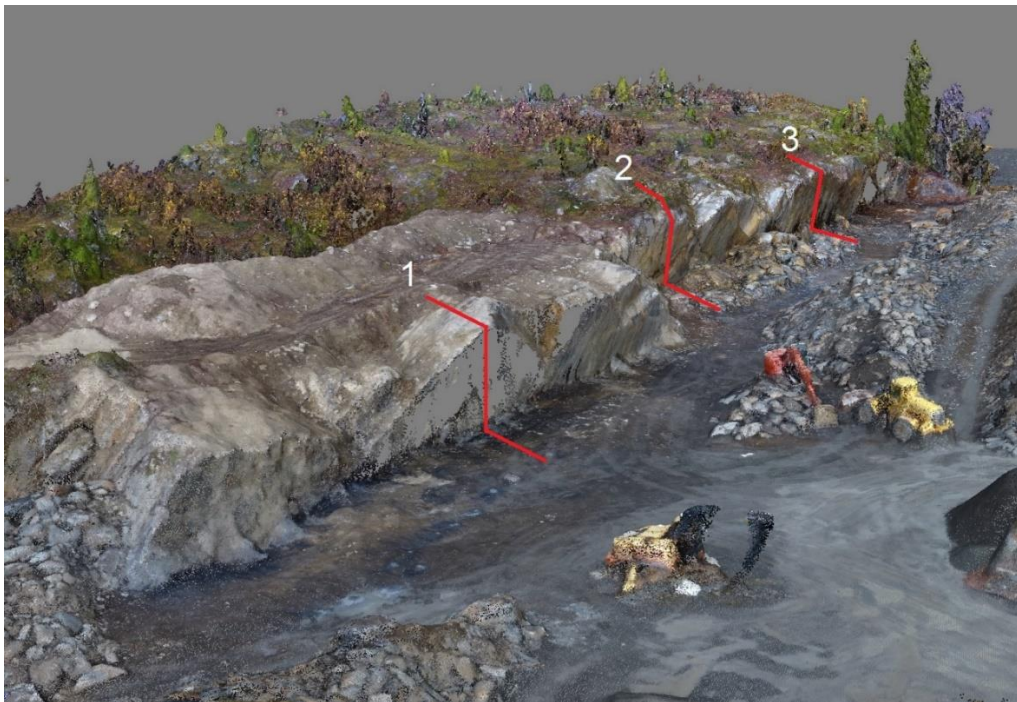
Kohteen ilmakuvauksaineistosta tehtiin kaksi eri mallinnusta: Ensimmäinen sisältää pelkästään nadiiria kohti kuvattuja kuvia ja toisessa samaa aineistoa on täy-

dennetty seinämää kohti, loivasti yläviistosta otetuilla kuvilla. Näitä kahta aineistoa vertaamalla oli tarkoitus selvittää nadiiria kohti kuvatun aineiston mahdollisten katvealueiden vaikutus malliin ja sen paikkansapitävyyteen.

Ilmakuva-aineiston kolmiointi tehtiin Agisoft Photoscan -ohjelmalla. Laserkeilauksen aineiston pistepilvi harvennettiin ja kolmioitiin Real Works -ohjelmalla. Molemmissa kolmioinneissa yksittäisten kolmioiden koko on niin pieni (n. 0,3 m), että ohjelmien mahdolliset erot pistepilven kolmioinnissa eivät ole merkittäviä kohteen mallintamisessa. Eri pistepilviaineistojen kolmiointien vertailu tehtiin Surpac-ohjelmalla, versiolla 6.6. Eri kolmioista tehtiin pintamallit, jotka yhdistettiin samaan tiedostoon ja aineistosta tehtiin leikkauksia kohtisuoraan louhoksen seinämää vastaan.

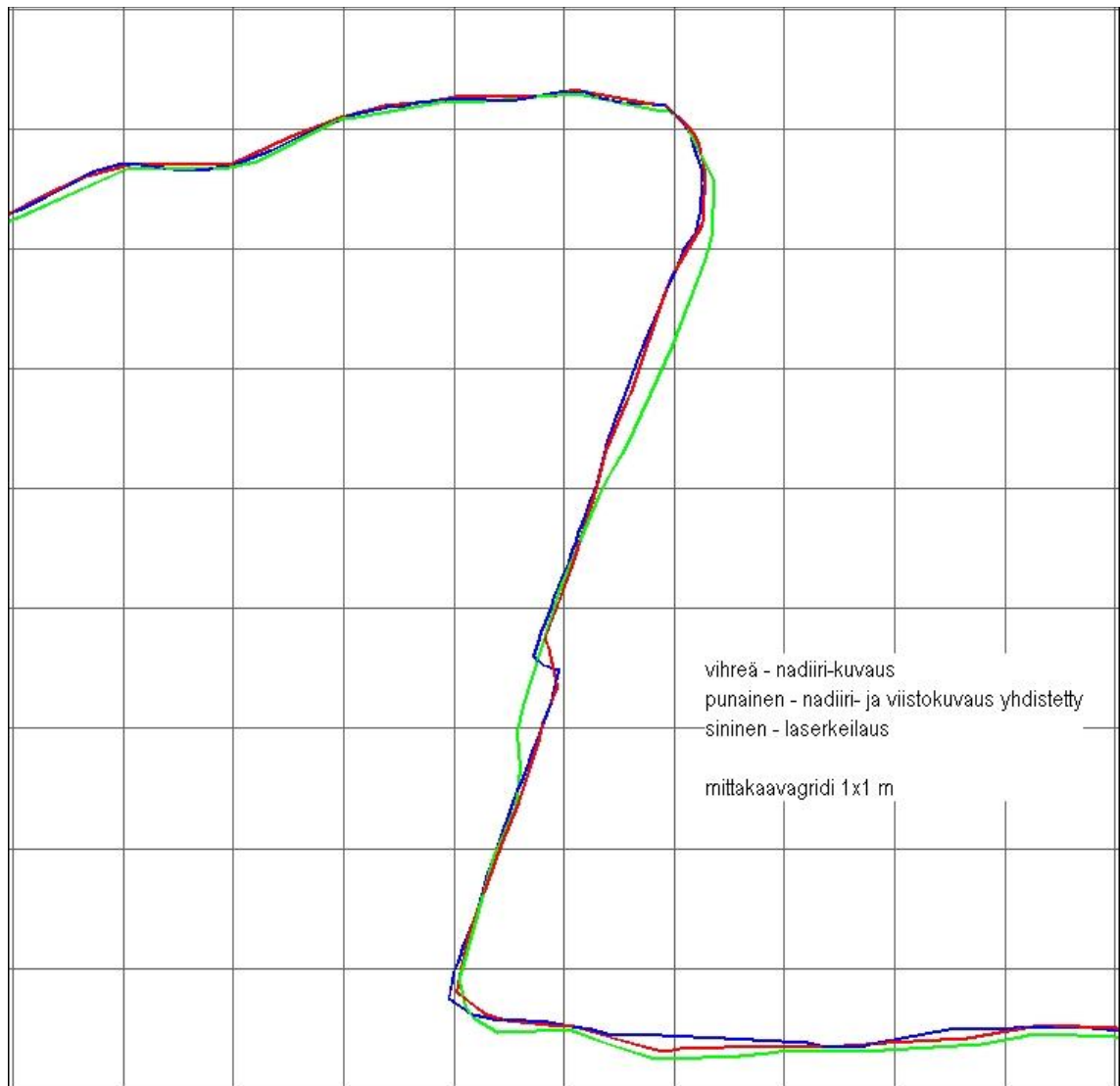
4.2.4 Poikkileikkausaineiston analyysi

Kuviossa 5 on esitetty poikkileikkausten sijainti louhoksen seinämämallissa. Kuva on Agisoft PhotoScan -ohjelmalla tuotettu tiheä pistepilvi, minkä vuoksi kuvan värit ja muodot ovat osin vääristyneet. Kuvan malli on tehty pelkästään nadiiria kohti kuvatusta aineistosta. Poikkileikkauksen 1 kohdalla on havaittavissa pistepilvessä aukko, joka on seurausta jyrkän seinän katvealueesta.



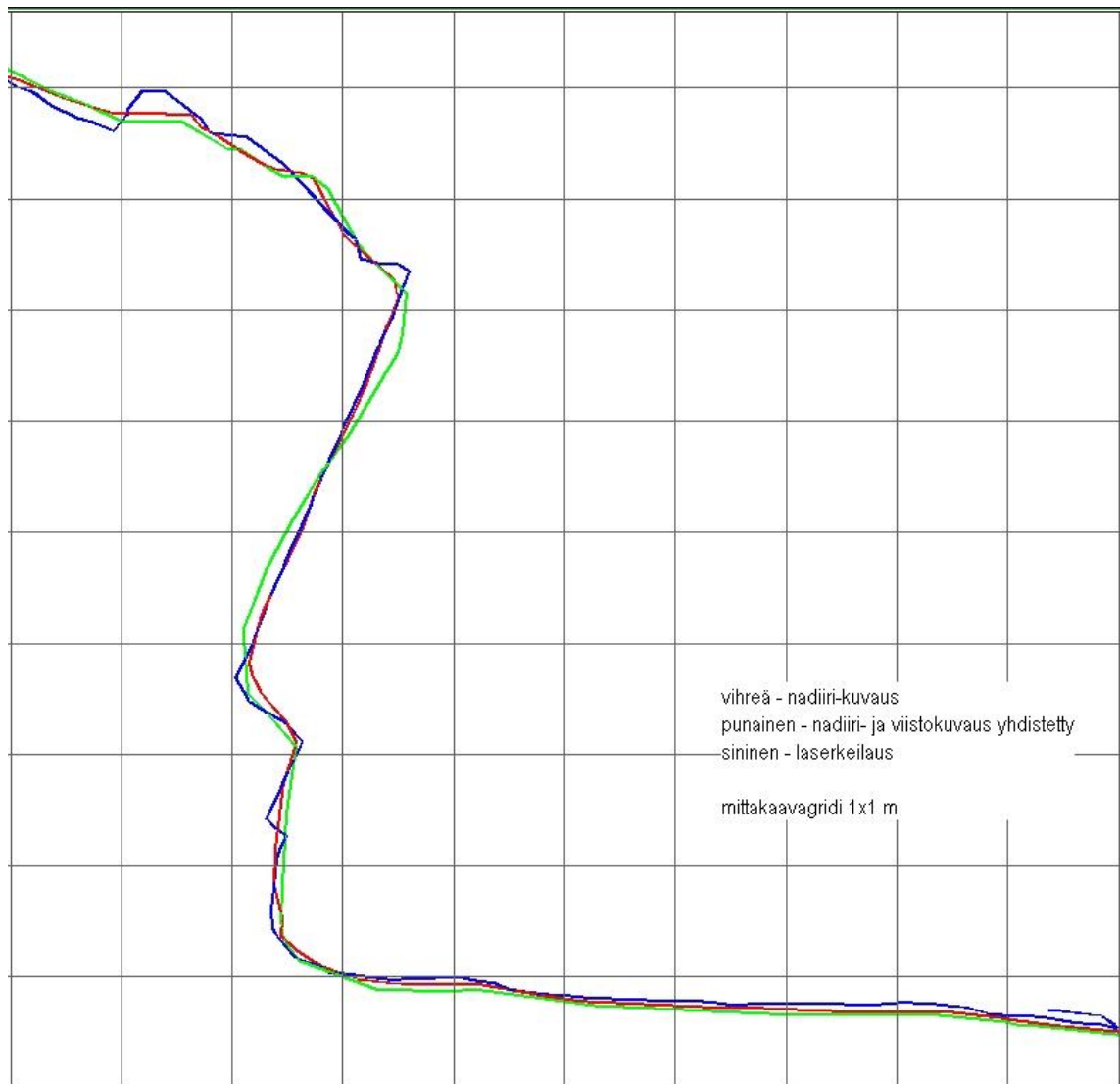
Kuvio 5. Poikkileikkausten sijainti

Kuvion 6 poikkileikkaus 1 on kohdalta, jossa pelkästään nadiiria kohti kuvatussa aineistossa (vihreä viiva) on katvealue. Viistokuvauksella täydennetyssä aineistossa (punainen viiva) pinta näkyy hyvin. Vertailussa näkyy selvästi, kuinka katveeseen jääneellä alueella mallinnettujen pintojen välillä on eroa enimmillään n. 25 cm. Samalla alueella viistokuvauksella täydennetty aineisto noudattelee muutamien senttimetrin tarkkuudella laserkeilausaineistoa (sininen viiva) eikä aineistojen välillä ole systemaattista poikkeamaa.



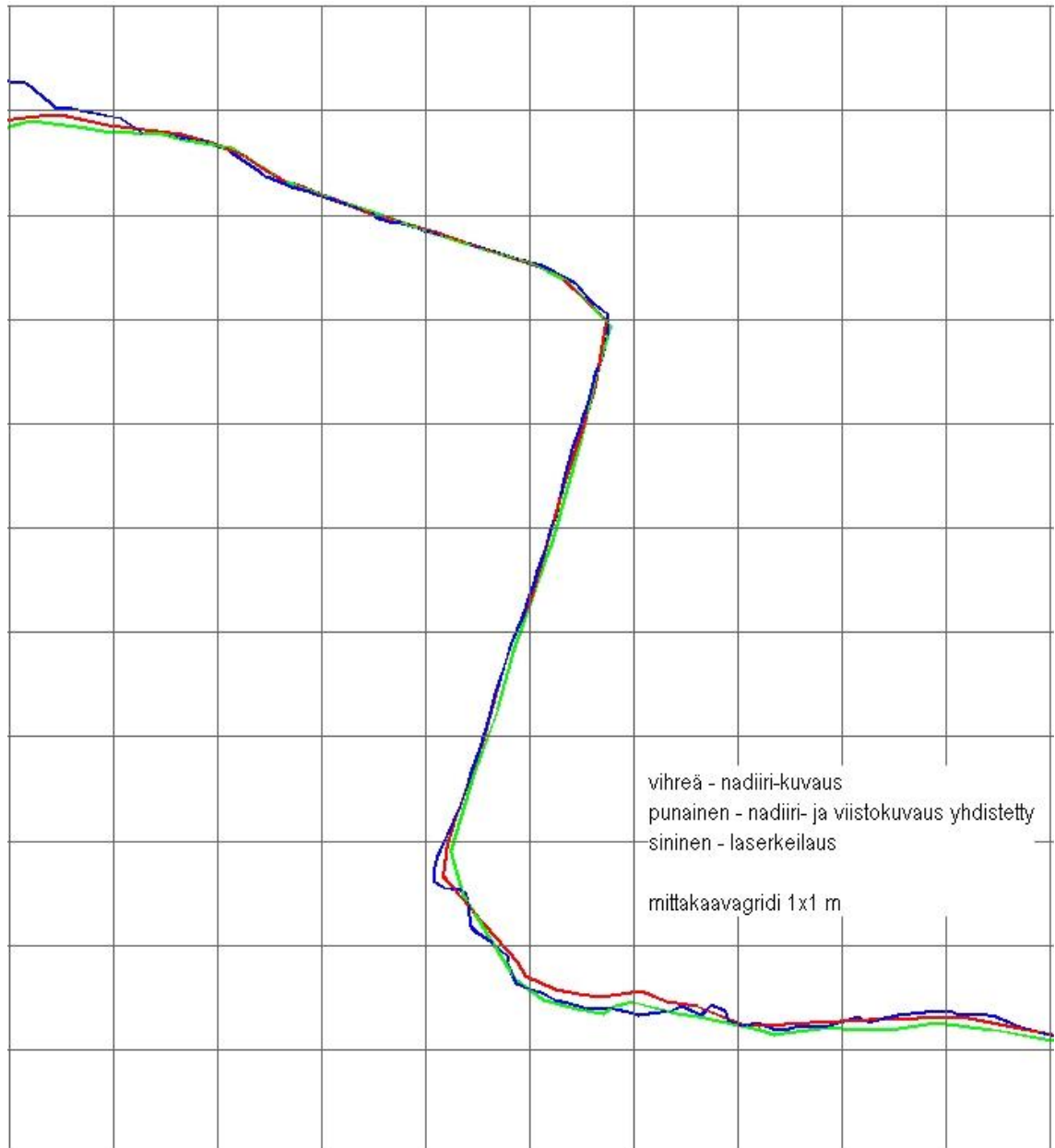
Kuvio 6. Poikkileikkaus 1, katvealueen vaikutus malliin

Kuvion 7 poikkileikkauksen 2 kohdalla molempien ilmakuvausten aineistot kattivat hyvin mallinnettavan pinnan. Kuviosta käy ilmi, että Agisoft Photoscan -ohjelman pistepilven muodostamisella ja sen kolmioinnilla näyttää olevan taipumus pyöristää pieniä ja teräviä pinnanmuotoja. Kuviosta on havaittavissa myös, että nadiiria kohti kuvatusta aineistosta tehty mallinnus poikkeaa seinämän jyrkällä osalla muista malleista, vaikka seinämä ei ollutkaan kuvilla täysin näkymättömissä.



Kuvio 7. Poikkileikkaus 2

Kuviosta 8 käy ilmi mallinnusten hyvä keskinäinen yhteneväisyys. Pelkästään nadiiria kohti kuvatussa aineistossa on enemmän poikkeamaa kuin viistokuvilla täydennetyssä aineistossa. Ilmakuva-aineiston perusteella mallinnettujen ja laserkeilauksen perusteella mallinnettujen aineistojen välillä ei ole havaittavissa systemaattista poikkeavuutta.



Kuvio 8. Poikkileikkaus 3

4.2.5 Yhteenveto Viinijärveltä

Louhoksen ylitsekaatuvat pinnat soveltuivat hyvin tutkimukseen, jossa selvitettiin jyrkkien muotojen mallintamista ilmakuvauksineistoon perustuen. Tilavuuslaskennan näkökulmasta voidaan todeta, että pinnan muoto ja jyrkkyys eivät vaikuta merkittävästi mallin todenmukaisuuteen. Viistokuvilla täydennetty ilmakuvauks tuottaa pintamallin, jonka poikkeamat laserkeilattuun aineistoon ovat alle 10 cm, eikä poikkeamassa ole havaittavissa systemaattista virhettä. Nadiiria kohti kuvattu aineisto soveltuu tilavuuslaskentaan, jos laskentatarkkuudessa hyväksytään jyrkkien seinämien kohdalla suurempi toleranssi. Edellä esitetystä voidaan päätellä, että DJI Phantom 4 -multikopterilla kerätty ilmakuva-aineisto on käyttökelpoista tilavuuslaskentaan Agisoft Photoscan Pro -ohjelmalla käsiteltynä myös louhoksissa ja vastaavissa kohteissa.

Jyrkkien pintojen näkymistä nadiiria kohti kuvatuilla kuvilla voi edesauttaa suunnittelemalla kuvausjonot jyrkkien muotojen suuntaisiksi ja näin hyödyntämällä kuvan leveyssuunnan laajempaa näkökenttää sekä lisäämällä sivupeittoa, jotta jyrkät pinnat näkyisivät useilla kuvilla ja siten myös mahdollisimman kaukana kuvan keskipisteestä. Huomattavan jyrkkien muotojen, kuten ylitsekaatuvien pintojen, mallintamista auttaa kuva-aineiston täydentäminen yläviistosta pintaa kohti kuvaamalla.

5 POHDINTA

Tutkimuksessa käytetty edullinen, harrastajakäyttöön tarkoitettu, UA-laite soveltuu riittävän tarkan valokuva-aineiston tuottamiseen tavanomaisiin maa- ja kiviai-
nesten tilavuusmittaustarkoituksiin. Laite tarvitsee tuekseen muuta mittauskalus-
toa sekä valokuvien kohdistamisen vuoksi että ilma-aluksen lennättämiseen so-
veltumattomien olosuhteiden varalta.

5.1 Kopterin soveltuvuus

DJI Phantom 4 -nelikopterin lennätysominaisuudet soveltuvat hyvin kartoitusmit-
taukseen. Laitteen akunkesto mahdollistaa kartoituslennon, joka kattaa riittävällä
peitolla 50 m korkeudella n. 7 ha ja 100 m korkeudella jopa 20 ha kerralla. Lait-
teen satelliittipaikanninominaisuudet mahdollistavat riittävän tarkan kuvausreitti-
suunnittelun.

Merkittävimmät rajoitukset Phantom 4 -kopterin käyttöön mittaustyössä liittyvät
laitteen sääolosuhterajoituksiin. Kopterin käyttölämpötila on määritelty vain 0 °C
ja sitä lämpimämpiin olosuhteisiin ja laite ei ole suojattu sadevedeltä ja kosteu-
delta. Nämä rajoitukset, mikäli niitä ei käyttäjän omalla riskillä ohiteta, rajaavat
laitteen käyttöaikaa huomattavasti. Laite ei voi olla ainoa käytettävissä oleva mit-
tausmenetelmä, mikäli mittaustyötä tulee tehdä säännöllisesti, ympärivuotisesti
ja ilman aikataulujoustoja.

5.2 Kameran soveltuvuus

Phantom 4 -kopterissa on kiinteästi asennettu kamera. Kiinteä, lievästi laajakul-
mainen objektiivi on suunniteltu ilmakuvaukseen kauko-ohjatussa ilma-aluk-
sessa. Kuvausohjelma MapPilot pystyi sovittavaan ilma-aluksen lentonopeuden
siten, että valistusolosuhteet ja niissä mahdollisesti tapahtuvat muutokset eivät
vaikuttaneet heikentävästi kuvien laatuun.

Tämän tutkimuksen valaistus- ja sääolosuhteissa kameran ominaisuudet riittivät
hyvin tuottamaan tarkkoja ja häiriöttömiä valokuvia. Tämän tutkimuksen kuluessa

eteen ei tullut vaikeampia sää- ja valaistusolosuhteita, jotka olisivat vaatineet laajempaa perehtymistä kameran ominaisuuksiin.

5.3 Ohjelmien soveltuvuus

MapPilot for DJI -ilmakuvaus- ja kartoitusohjelma toimii DJI Phantom 4 -nelikopterin kanssa moitteettomasti. Ohjelman avulla lento- ja kuvaussuunnitelma on helppo tehdä perusasetuksilla ja ohjelma mahdollistaa jonkin verran käyttäjän omia asetuksia myös kameran käyttöön.

Agisoft Photoscan Pro -ohjelma on ammattikäyttöön tarkoitettu ja siitä on muodostunut suosittu fotogrammetrisen aineiston käsittelyohjelma. PhotoScan on ollut käytössä lukuisissa saman alan opinnäytetöissä aiemmin. Jatkossa olisi mielenkiintoista tehdä käytettävyyssvertailuja myös muiden ohjelmistojen, kuten erilaisiin pilvipalveluihin perustuvien edullisempien ratkaisujen kanssa.

5.4 Oma arvio

Miehittämättömien ilma-alusten käyttö maanmittauksessa on jo arkipäivää. Voidaan hyvin ajatella, että kevyen UA-laitteiston käyttö on, jos ei nyt niin hyvin pian lähitulevaisuudessa, olennainen osa maastomittauksen ammattitaitoa.

Ensisijaisesti harrastajakäyttöön suunnattujen multikopterien käyttö tulee lisääntymään ammattimaisessakin toiminnassa. Edullisilla laitteilla on helppo tutustua menetelmien mahdollisuuksiin ja ottaa niitä ottaa kokeilukäyttöön. Palvelujen tarjonta tulee lisääntymään ja edullisiin laitteisiin perustuvat mittauspalvelut tulevat vaikuttamaan alan markkinoihin. Uudet toimijat eivät välttämättä aina tule maanmittausalan perinteisistä piireistä.

Itse en ollut aiemmin käyttänyt fotogrammetrista mittausta missään käytännön työssä ja menetelmä oli tuttu vain teoriassa. En ollut myöskään aiemmin tutustunut miehittämättömiin ilma-aluksiin enkä niiden käyttöön mittauksessa muuten kuin alan kirjallisiin lähteisiin perehtymällä. Kaikki työni kannalta tärkeät laitteet ja ohjelmistot olivat minulle entuudestaan tuntemattomia.

Kokonaan uudenlaisen työskentelytavan opetteleminen alkeista lähtien oli mielenkiintoinen ja opettavainen kokemus. Sain otettua haltuun kokonaan uuden työkalun siinä laajuudessa, että koen voivani käyttää sitä tarkoituksenmukaisesti työtehtävissäni. Sain myös mielestäni vankan pohjan, jolle voin hankkia lisätietoa UA-fotogrammetrian uusista sovelluksista ja uusista käyttötarkoituksista, ja näin voin soveltaa hallitsemaani tietotaitoa uudenlaisiin ympäristöihin.

LÄHTEET

Agisoft 2016a. PhotoScan Fully automated professional photogrammetric kit. Agisoft. Viitattu 7.9.2016 http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_presentation.pdf.

– 2016b. Tutorial (Beginner level): Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.2 (with Ground Control Points). Agisoft. Viitattu 5.10.2016 [http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.2%20-Tutorial%20\(BL\)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20\(with%20GCPs\).pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.2%20-Tutorial%20(BL)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20(with%20GCPs).pdf)

AppStore 2016. Map Pilot for DJI. Apple. Viitattu 10.10.2016 <https://itunes.apple.com/fi/app/map-pilot-for-dji/id1014765000?mt=8>.

DJI 2016. PHANTOM 4 User Manual V1.2. DJI. Viitattu 12.9.2016 https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4/en/Phantom_4_User_Manual_en_v1.2_20160805.pdf.

Drones made easy 2016. Drones made easy. Viitattu 12.9.2016 <https://www.dronesmadeeasy.com/default.asp>.

Finavia 2016. Ilmailukäsikirja. AIP Suomi - Finland. Finavia Oyj. Viitattu 8.9.2016 <https://ais.fi/ais/eaip/fi>.

Higgins, S. 2016. Drone LiDAR vs Photogrammetry: A Technical Guide. SPAR 3D. Viitattu 6.9.2016 <http://www.spar3d.com/news/lidar/drone-lidar-vs-photogrammetry-technical-guide>.

Helander, I. 2015. UAV:n avulla tuotetun fotogrammetrisen pistepilven vertailu ja käytettävyys. Lapin Ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikka. Insinööri (AMK) opinnäytetyö.

Hokkanen, J. 2015. UAV-kopterin pistepilven tarkkuus. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikka. Insinööri (AMK) opinnäytetyö.

Ilmailulaki 7.11.2014/864.

Jokinen, A.-P. 2014. UAV-kuvaus kiviainesten kartoituksessa. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikan tutkinto-ohjelma. Insinööri (AMK) opinnäytetyö.

Laurila, P. 2010. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet 3.p. Rovaniemen ammattikorkeakoulu julkaisusarja D nro 3. Viitattu 16.9.2016 http://virtual.ramk.fi/Tuotantoalat/eJulkaisu_Mittaus%20ja%20kartoitustekniikka_Laurila.pdf.

Leica 2016. Leica Nova MS50 Datasheet. Leica Geosystems. Viitattu 23.9.2016 http://www.leica-geosystems.fi/downloads123/zz/tps/nova_ms50/brochures-datasheet/Leica_Nova_MS50_DAT_en.pdf.

Lyons, M. 2016. Photography Calculators. Viitattu 27.10.2016 <http://www.tawbaware.com/maxlyons/calc.htm>.

Partonen, I. 2014. Pienellä UAV-lennokilla (sUAV) kerätyn datan pistepilven korkeustarkkuuksista – case Nokian Renkaat. Rakentamisen koulutusohjelma. Insinööri (YAMK) opinnäytetyö.

Rahko, S. 2015. Miehittämättömien lentojärjestelmien (UAS) soveltuminen mas-salaskentaan. Lapin Ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikka. Insinööri (AMK) opinnäytetyö.

Tompkinson, W. 2016. Can Anyone with a UAV Call Themselves an Aerial Surveyor? SPAR 3D. Viitattu 6.9.2016 <http://www.spar3d.com/blogs/measuring-the-value/will-uavs-really-lower-cost-surveying-project>.

Trafi 2015. Määräys OPS M1-32. Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen. Viitattu 8.9.2016 http://www.trafi.fi/file-bank/a/1444309294/3965f696e8f5d3879ef280bd1c0e6b5f/18719-OPS_M1-32_fi.pdf.

Trafi 2016a. Multikopteritoiminta Suomessa ja koptereiden turvallinen käyttö. Turvallisuustiedote Ilmailu 29.8.2016. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. Viitattu 7.9.2016 http://www.trafi.fi/file-bank/a/1472468469/794f1685093843f7b956fd3d8b64a10e/22300-Ilmailu_turvallisuustiedote_RPAS_lennokki.pdf.

– 2016b. Miehittämätön ilmailu. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. Viitattu 15.9.2016 http://www.trafi.fi/ilmailu/miehittamaton_ilmailu.

Wang, D. 2016. The Economics of Drone Delivery. Flexport. Viitattu 6.9.2016 <https://www.flexport.com/blog/drone-delivery-economics>.

LIITTEET

Liite 1. DJI Phantom 4, kameran ominaisuudet

Liite 1

DJI Phantom 4, kameran ominaisuudet

Sensori	1/2.3" (CMOS), Effective pixels:12.4 M
Objektiivi	FOV 94° 20 mm (35 mm format equivalent) f/2.8, focus at ∞
ISO käyttöalue	100-3200 (video), 100-1600 (photo)
Sulkimen nopeus	8s -1/8000s
Suurin kuvakoko	4000x3000
Valokuvaustilat	Single shot Burst shooting: 3 / 5 / 7 frames Auto Exposure Bracketing (AEB): 3 / 5 bracketed frames at 0.7 EV Bias Timelapse HDR
Videokuvaustilat	UHD: 4096x2160 (4K) 24 / 25p 3840x2160 (4K) 24 / 25 / 30p 2704x1520 (2.7K) 24 / 25 / 30p FHD: 1920x1080 24 / 25 / 30 / 48 / 50 / 60 / 120p HD: 1280x720 24 / 25 / 30 / 48 / 50 / 60p
Maksimi Video bittinopeus	60 Mbps
Tuetut tiedostomuodot	FAT32 (\leq 32 GB); exFAT ($>$ 32 GB) Valokuva: JPEG, DNG (RAW) Video: MP4, MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
Tuetut SD-kortit	MicroSD Max capacity: 64 GB. Class 10 or UHS-1
Käyttölämpötila	32 °F to 104 °F (0 ° to 40 °C)